

三段跳に関する科学的研究について

金 洪兵

The scientific researches in the triple jump

Hongbing Jin

Abstract

The purposes of this study were : (a) to describe the history of scientific researches about the triple jump ; (b) to obvious the contents of the research and the method of the research related the triple jump ; (c) to clear the research direction about the triple jump in the future. The research paperes that are international and national were referenced in this study respectively. The results obtanined from this study were as follows :

1. Simultaneous recordings of the action of the hip, knee, ankle, and big toe joints during the execution of the triple jump were measured by means of electrogoniometry. The degrees of angles at these joints were analyzed. It was found that there was sequential extension of the joints prior to the instant of take-off ; the hip began to extend first, followed by the knee and then the ankle.
2. The filmed records of the best jumps of Banks were analyzed at the 1985 TAC Championships. The distances for the hop, step, and jump phases of the analyzed the jump of the world record were obvious. The hop covered 35.1% of the total distance, the step 27.6%, and the jump 37.3%.
3. The apparent spring constants of the support leg in eccentric and concentric phases were investigated in the triple jump. In the triple jump take-offs of the spring constants for the concentric phase were 0.217 N/mm/kg in the hop, 0.107 N/mm/kg in the step, and 0.116 N/mm/kg in the jump
4. The essential conditions were estimated for an 18-m jump. It might be said that the 18-m jumper must gain great run-up velocity (10.7 m/s) and exert forces during each supporting phas which are 3.6-4.4 times the body weight, resulting in a force-vector angle of about 101° at each take-off.

1. はじめに

近代競技種目である三段跳運動は、発生してから現在に至るまですでに100年以上の歴史を持っている。古くから Kelt 人らによってお祭 (Volksfesten) などで行われていた跳躍運動が、変わったものといわれている¹⁸⁾。近代競技としての三段跳びの発祥地は、Scotland の low-lands であり、ホップ、ホップ、ステップという片足の跳び方は、三段跳びの原型と言われている²⁵⁾。一方、19世紀の後半に体操運動から発展したステップ、ステップ、ジャンプというドイツ三段跳びもあった¹⁸⁾。その後、三段跳びの跳び方は、次のように定着してきた。助走後、同じ脚による2回の踏切、さらに逆の脚による1回の踏切及び両脚での着地から成り立っており、初めての踏切から第2回目の踏切までをホップ (HOP)、第2回目の踏切から第3回目の踏切までをステップ (STEP)、第3回目の踏切から両脚着地までをジャンプ (JUMP) とよんでいる (図1)。また、「三段跳び」という日本名は、昭和のはじめに織田氏によって名付けられた²³⁾。1896年の第一回オリンピック大会では、三段跳びの最初の記録 (13.78 m) が誕生した。今世紀初頭の三段跳びの世界記録は15.52 m であり、アメリカのダンアハーン選手によってつくられた。そのあと、1920年~1930年の10年間には、スピードと脚力を強化しながら記録の向上が目指された。1930年~1960年の30年間には、スピードや脚力を効果的に発揮する新しい技術を開発することによって16 m 台から17 m 台への足がかりを築いた²⁴⁾。80年経た現在において三段跳びの世界記録は約4.2 m 伸び、すでに17.97 m となり、18 m に近づいた。そして18 m を越える日は、遠くないと予測される。

これまでに競技スポーツは、さまざまな手段を用いてその特性が科学的に明らかにされてきた。それらの研究手段の一つにスポーツバイオメカニクスがある。この方法を用いて三段跳びを研究する際、キネマティクス (kinematics, 運動学) とキネティクス (kinetics, 運動力学) という2つの側面から取り組まれる。キネマティクスは、三段跳び選手の特定の身体部位の動きに注目し、変位、時間、速度、加速度という変数を用いて運動の特徴をあきらかにされる。一方、キネティクスは、身体全体が受ける外力から、力積、機械的エネルギー、機械的仕事、機械的パワー、さらには運動を遂行する源である内力、筋パワー、関節トルクなど、運動発見のもとになる (force) を明らかにする。バイオメカニクスの観点から陸上競技の跳躍種目を分析した研究は、いくつか報告されている。陸上競技の跳躍種目の中で走り幅跳びについては、1935年の Cureton⁶⁾ の報告以来、上述した2つの方面より数多く行われてきた³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁹⁾²²⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾。これに比べて、三段跳びについてのバイオメカニクスの研究は、まだ少ない。本研究では、この点に着目し、日本および諸外国の研究雑誌に報告されている三段跳びに関するバイオメカニクスの研究を収集し、これまでに明らかにされていることを整理するとともに、今後検討すべきことを考えることにした。

2. 三段跳びのキネマティクス

三段跳びは、助走、ホップ、ステップ、ジャンプ、着地という五段階で構成されている。研究上、最初に着目されたのは、ホップ、ステップ、ジャンプという3つの踏切局面であった。Ganslen (1956, 1964¹⁵⁾¹⁶⁾ は、連続写真を用いて定性的な手法により三段跳びのホップ、ス

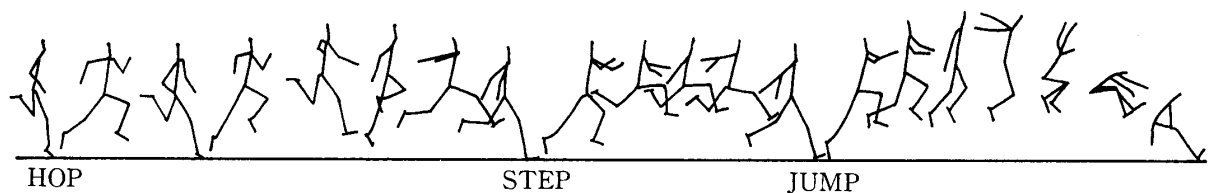


図1 バンクス選手の三段跳フォーム

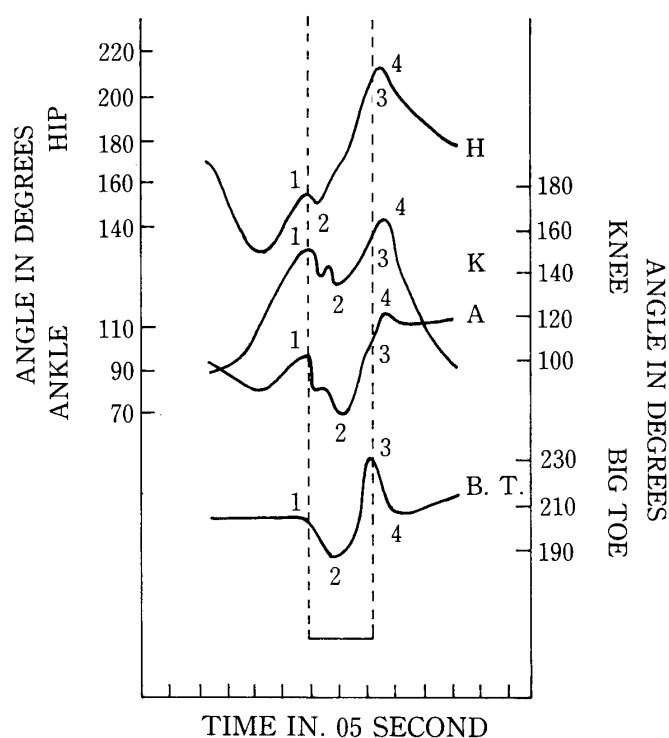


図2 三段跳の踏切における股関節 (H), 膝関節 (K), 足関節 (A) 及び母指球関節 (B. T.) の角度変化。

1 は着地時点, 2 は各関節が屈曲時点, 3 は爪先が地面から離れる時点, 4 は離地後 H, K, A が大きく伸展する時点, BT は屈曲時点 (Klissouras と Karpovich 1967)

テップ, ジャンプを観察し, いろいろな問題点を指摘した。三段跳びを最初に定量的に分析したのは, Klissouras ら (1967¹⁷⁾) の研究であった。その年代においては, 三段跳びの世界記録は, ポーランドの Schmidt により 17 m を越えたばかりで, 飛躍的な進歩の回顧と新たな発展を追求する時期でもあった。Klissouras らは, ゴニオメータを用いてホップ, ステップ, ジャンプの踏切局面における踏切脚の股関節, 膝関節, 足関節, 母指球関節の角度変位を初めて記録した(図2)。その研究から, 4つの関節が踏切時に屈曲し離陸時に伸展することや, 踏切中の脚の伸展は, 股関節, 膝関節, 足関節の順に行われたことを明らかにした。しかし, ゴニオメータを付けることによって運動が制限されるから, 選手は普通のように跳躍することが, かなり困難になるのではないかと考えられる。

三段跳びにおける効果的な下肢動作に着目し, 初めて映画法を用いて分析を行ったのは, 木村 (1970¹⁸⁾) であった。彼は, より大きなパ

フォーマンスを生むために効果的な動作 (swing type) が必要であることを立証するため, この研究を行った。脚の軌跡による動作の比較を図3に示す。右側は踏切脚, 左側はスウィング脚である。全体的な軌跡の流れにおいて 16.5 m という記録を持つ A は, B と C より軌跡が滑らかで, 空間での振り戻しが大きく, 踏みきりの後半まで続いているのが見られる。彼は, 下肢の二関節の isotonic な作用が導く Swing-type が, Relative rotation moment (関係回転力) と Relative inertia (関連慣性) により末端の運動量を増大させ, 同時に相動的神経支配からの拮抗作用により locomotion での推進力と speed の増大にさせると考えた。そして, そのようなことがパフォーマンスを高めるために有効なものであると提言してきた。

Bober (1974²¹⁾) は, 三段跳びの試合を観察し, 一直線上を跳ぶのがたいへん難しいことを気づき, 17名の三段跳び選手を対象に映画法を用いて跳躍中にどれだけ助走路の中央線から外れる

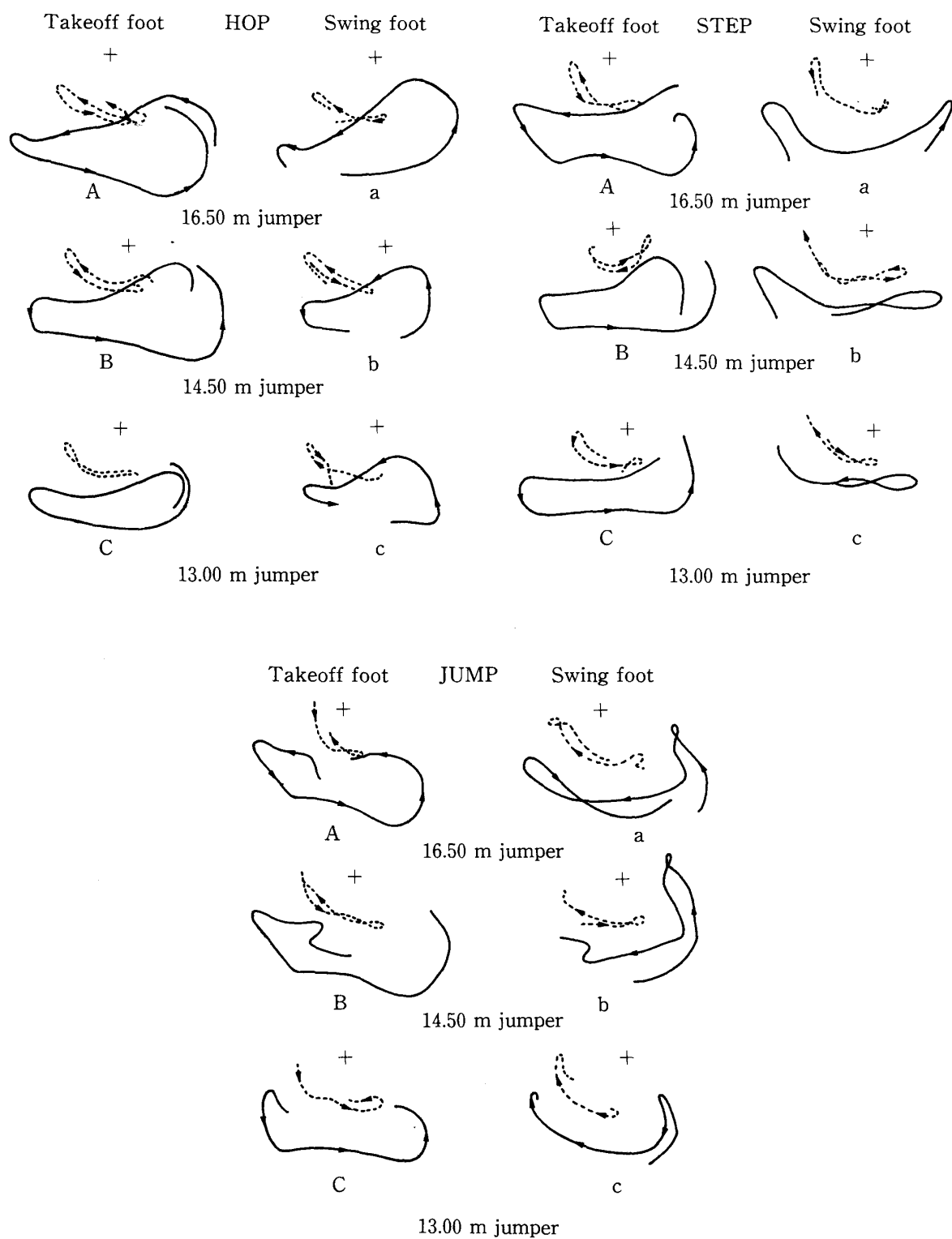


図3 各踏切における膝と足先の軌跡 (木村 1970)

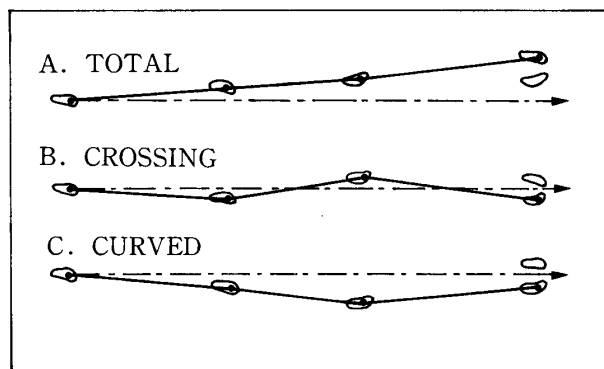


図4 三段跳における各種の着地のタイプ
(Bober 1974)

かを研究した。17名の選手は3種類の跳び型をつかっていた(図4)。つまり、踏みきり脚の外側型、クロス型及び踏切脚の内側型であった。51回の試技中、31回は一直線上で行われたが、10回の試技は中央から大きくはずれた。その距離は、40 cmであった。また、三段跳び中の偏離は、体幹の傾斜との関係があることを明らかにした。脚の傾斜の平均角度は、 5.9° であり、体幹との脚の傾斜角度の間に $r=0.62$ の相関があると確認した。しかし、この関係がパフォーマンスにどんな影響を与えるかについては報告しなかった。

16 m 映画法を用い、kinematics と kinetics の面から三段跳びを初めて研究したのは、深代らであった¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。その結果は、下記のようなものである。ジャンプの距離と全跳躍距離との間に相関関係がなかった、ホップとジャンプのときの前後方向の速度は、各跳躍距離との間に有意

な正の相関関係があったがステップではなかった、鉛直方向の速度は、ホップ、ステップで各跳躍距離と有意な正の相関関係があったことを述べている。ステップと跳躍距離との間に相関がないことに対して深代は、ステップでは水平速度を維持するとは容易であるが、それを維持しても跳躍距離に結びつかないのに対して、ジャンプでは水平速度を維持することが困難であるが、困難な中でそれを維持することが跳躍距離を大きくするのであると解釈していた¹⁴⁾。また、ステップでは水平初速度と跳躍距離との間に負の相関関係があったことに対して、彼はステップの空中の最大重心高よりホップのそれの方が10%高いことを考えると、ステップの踏切は大きな着地角と小さい投射角で構成されていると考えられ、Dyson が述べるように着地角と投射角がこのような関係にあるとき、容易に水平速度を維持することができると考えた。また、ステップでは、踏みきり前半で非常に大きな負の仕事が生じ、それに抗して鉛直速度を増加させることが困難であることを考慮して、ステップの踏みきりでは小さい鉛直速度が小さい投射角につながり、それによって水平速度の維持に結び付くと説明している(表1)¹⁴⁾。さらに、彼は水平速度、鉛直速度および跳躍距離との関係から18 mを跳ぶ条件を予測し、助走では10.7 m/sで走ることを、ホップ、ステップ、ジャンプで発揮する力はそれぞれ36.4 N/kg、44.6 N/kg、42.9 N/kgであることが必要であると推測している(図5)¹³⁾。

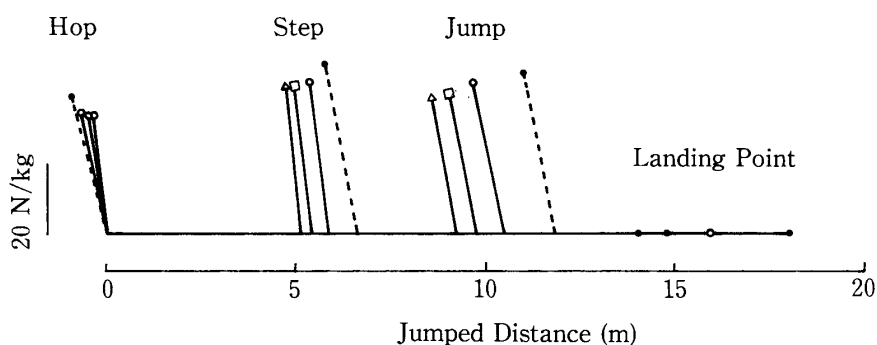


図5 18 m ジャンパーのキック力の推測。△はAグループ、□はBグループ、○はCグループ、●は18-m ジャンパー (Fukashiro ら 1983)

三段跳びを対象に実験する場合においては、実験の目的に応じて被験者の状況を把握し、できるかぎり実験の条件と環境より被験者にマイナスの影響を与えないように努めているつもりであるが、ポイントマークの貼付や試合と異なる雰囲気などによるマイナスの影響を考慮しながら実際の現場で撮影を行い、三段跳びを研究する人もいた。Miller と Hay (1985²³⁾) は、世界記録保持者を含む世界一流選手を対象に、1985 年から 1988 年にかけて全米選手権の三段跳び試合を撮影し、キネマティクスの方面から三段跳びを研究した。撮影は、2 台のシネカメラにより行われた。その結果、世界記録保持者バンクスは、ホップで 6.30 m、ステップで 4.96 m、ジャンプで 6.69 m を跳び、跳躍比率は、35.1% (ホップ)、27.6% (ステップ)、37.3 (ジャンプ) であることが明らかにされた (図 6)。また、助走の最後一步の水平速度は毎秒 10.4 m であること、ホップ、ステップ、ジャンプの踏切離地時の水平速度は、それぞれ 9.50 m/s、8.67 m/s、7.32 m/s 鉛直速度は、それぞれ 2.18 m/s、1.72 m/s、2.81 m/s であることを明らかにした。また、同一選手の走り幅跳びと三段跳びの水平速度を比較してみると、三段跳びの助走速度は、走り幅跳びよりも 1 m/s 遅いことがわかった。このことについて Miller と Hay は、三段跳びで連続跳躍が行われることや速い速度

により生じた衝撃に耐えられないことなどがあるため、三段跳びでは、助走スピードを抑えて踏切に入るのではないかと推測した。したがって、個人内における助走の至適速度は、走り幅跳びと比較し三段跳びのほうが低く、この事実は、走り幅跳びよりも三段跳びのほうが踏切技術がもっとも厳しく要求されることを示唆する。また、この研究で最も新しい発見は、世界一流選手が、ステップ局面に入る時に pawing landing 動作を、ジャンプの局面に入る時に blocking landing 動作を行ったことである。Pawing landing は、積極的着地と言われるもので、着地の際に踏切脚を前から後ろに引っかくように振り降ろし、踏切でのブレーキを少なくするという着地方法である。また、Blocking landing は、脚を棒のようにして着地するもので、ブレーキをかけて鉛直速度を得る着地方法である。上記の二つの方法は、すでに走り幅跳びの踏切で使われたことがある⁶⁾。

女子三段跳び競技の開始にともない、女子選手を対象にした三段跳びの研究がコーチと研究者に注目されるようになった²⁰⁾。ミシガンの大学教授であり、また東部ミシガンで女子跳躍コーチを務めるクリフォード・ラーキは、8 名の高校女子選手を対象に初心者者の三段跳びの生体力学的研究を行い、初心者女子と先行研究における上級者男子とを比較した。その結果、踏

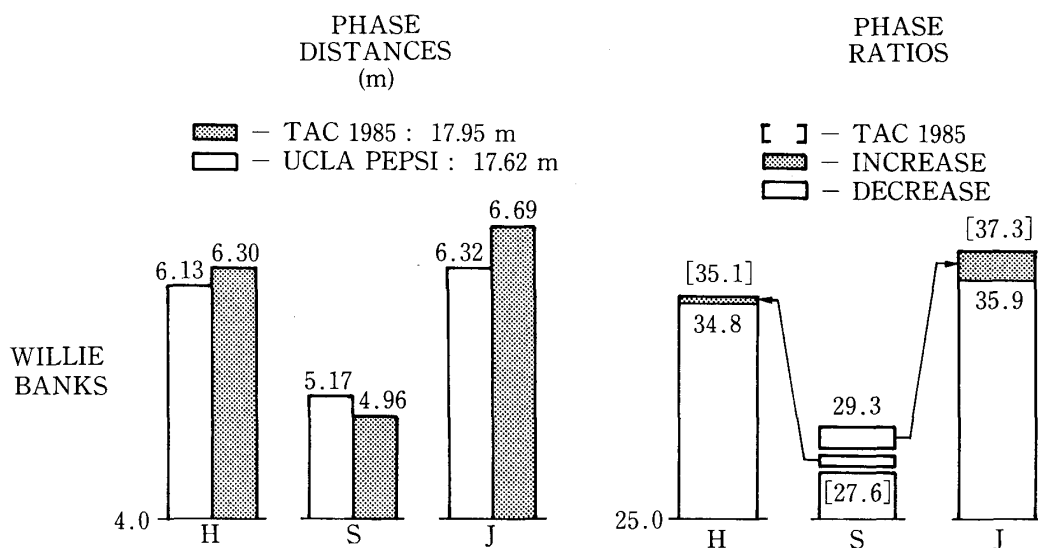


図 6 バンクス選手の各跳躍距離と跳躍比 (Miller と James 1986)

切水平速度や踏切時間のパターンについては男女とも類似していることが明らかにされた。また、初心者女子三段跳び選手と上級者男子選手の最も顕著な相違は跳躍距離の配分にみられた、初心者女子選手は「普通ー短いー長い」という分配パターンを示した。

3. 三段跳びのキネティクス

運動の源となる力学量(地面反力、回転運動、関節トルク、機械的パワー)から三段跳びを分析した研究もこれまでにいくつか見られる。

三段跳びにおける機械的エネルギーを定量化したのは、深代らであった¹²⁾¹³⁾。彼らは、次式によって三段跳び中の機械的エネルギーを算出した。

$$\begin{aligned} ME_{CG} &= KE_{CG} + PE_{CG} \\ &= 1/2 mV^2 + mgH \end{aligned}$$

ここで、 ME_{CG} は総機械的エネルギー、 KE_{CG} は運動エネルギー、 PE_{CG} は位置エネルギー、 m は身体質量、 V は質点のもつ速度、 H は質点の高さ、 g は重力加速度である。

機械的エネルギーを求めることにより、三段跳び中のエネルギーの流れを推察することができる。

図7に示しているよう三段跳びでは総エネルギーの大部分は水平方向の運動エネルギーが占めている。三段跳び中の総エネルギーの変化を見ると、踏切前半に減少(負の仕事)し、後半に増加(正の仕事)するが、負の仕事に比べて正の仕事が少ないことから、総機械的エネルギーは踏切ごとに減少していく。正の仕事は、3つの踏切で4.9~5.2 J/kgの範囲にあるが、負の仕事は、ホップが約-6 J/kg、ステップとジャンプが約-12 J/kgと報告されている¹⁴⁾。

地球上における物体は、位置関係を変えようとすれば、少なくとも3つの力を考えなければならない。つまり、重力、空気の流れによる抵抗及び地面からの反力である。三段跳びではとくに、地面反力の影響が重要であると考えられる。しかし、三段跳びにおける地面反力を測定するのは方法上困難であるため、深代らは映画撮影分析法により鉛直速度と水平速度を算出し、地面反力の推定を試みた。深代らは、微分

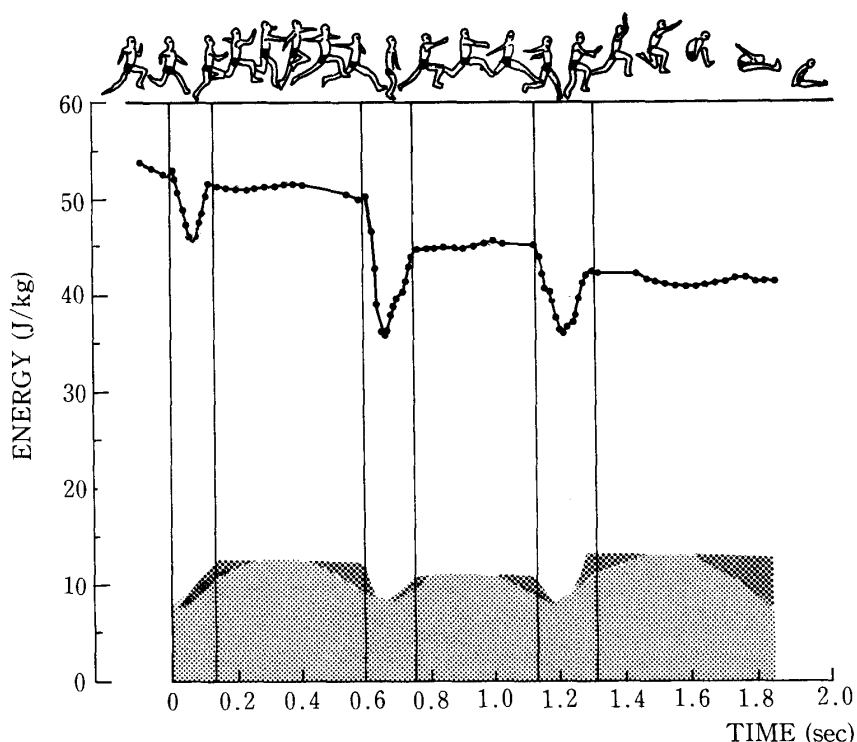


図7 三段跳における身体重心のエネルギー変化。■は位置エネルギー、▨は鉛直方向の運動エネルギー、□は水平方向の運動エネルギー (Fukashiro ら 1981)

操作による有効数字の減少から瞬時値を求めることは不可能であったため、次の式によって平均力のみを求めた¹¹⁾¹²⁾。

$$F_h = [(x_2 - x_1)/t] m$$

$$F_v = [y_2 - y_1]/t + g] m$$

ここで、 F_h は水平方向の平均の力、 F_v は鉛直方向の平均の力、 m は身体質量、 g は重力加速度、 t は踏切時間、 x_1 は着地時の水平速度、 x_2 は離地時の水平速度、 y_1 は着地時の鉛直速度、 y_2 は離地時の鉛直速度である。

Hay ら⁸⁾ も上記と同様の方法を用い、1984 年オリンピックにおいて 12 名の三段跳び選手を対象に、踏切力の推定を行った。ホップ、ステップ、ジャンプの踏切における平均力は、負の局面で 360～625 N であり、正の踏切局面で

2419～2860 N であった。いずれの局面においても最も大きかったのは、ステップの時であった。彼は、得られたデータに基づき、三段跳びの記録を決定する要因を報告した(図 8)⁸⁾。図 8 に示しているように三段跳びの記録は、踏切時の身体重心の鉛直速度と水平速度によって決定される。また、鉛直速度と水平速度は、それぞれ着地時の身体重心の鉛直速度、水平速度、鉛直速度の変化、水平速度の変化によって決まる。なお、身体重心の鉛直速度、水平速度、鉛直速度の変化及び水平速度の変化は、鉛直方向の平均力、水平方向の平均力、選手の質量、接地時間という 4 つの決定因子により決められると報告した。ここで、鉛直方向の平均力と水平方向の平均力を 1 つのベクトルの力として考えれ

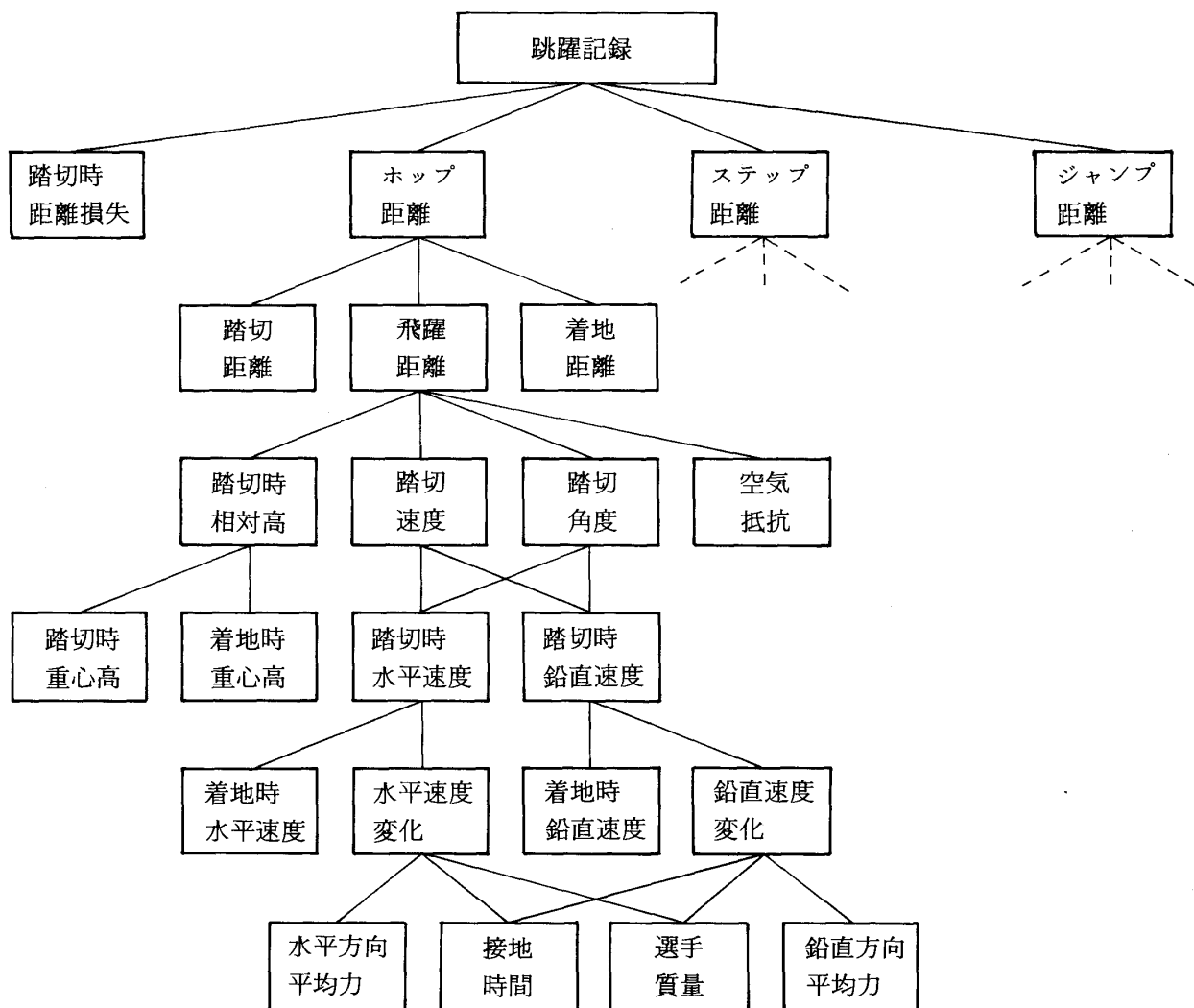


図 8 三段跳記録の決定因子 (Hay と Miller 1985)

ば、決定因子は3つになる。つまり、時間、力及び質量である。 $V_1 - V_2 = 1/2 mFT$ という式を用いてみると、より大きな速度を得るために、選手の質量を少なくすることや踏切時の力を大きくすることや踏切の時間を長くすることが欠かせない要因として考えられる。

三段跳びの地面反力をフォースプレートを用いて初めて測定したのは、Ramey と Williams (1985²⁷⁾)である。彼らは、4人の大学生選手を対象に1台のフォースプレートを用いてホップ、ステップ、ジャンプの地面反力を測定した。三段跳びにおける衝撃力は体重の8～12倍であったと報告している。

歩行、走行及び跳躍において伸張性収縮が行われる時、弾性エネルギーが蓄えられ、次の短縮性収縮時に利用されると、Luhtanen と Komi (1980²¹⁾)は報告した。彼たちは踏切における身体動作について Alexander (1975¹⁾)の力学的モデルを引用し、各種踏切時の弾性（バネ定数： K_i ）を検討した。彼が利用した計算式は次のとおりである。

$$K_i = (\pi mg(ai + bi)/2 bi [(hi^2 + bi^2)^{1/2} - (hi - \Delta y_{li})])/m$$

ここで m は質量、 a_i は身体重心の最高時点から着地時までの水平距離と離地時から身体重心の最高時点までの水平距離、 b_i は着地時点から重心が最も低い時点までの鉛直距離と最も低い時点から離地時までの鉛直距離、 h_i は、着地時点と離地時点の重心高、 Δy_{li} は、重心が最も低い時点から離地時までの鉛直距離の差と離地時から最高点までの鉛直距離の差である。この式で計算された結果から、正の局面における三段跳びのバネ定数は走り幅跳びより大きかったが、負の局面では三段跳びのバネ定数は走り幅跳びよりも小さかったことが明らかにされた。

4. 今後の課題

これまでに報告されている三段跳びのバイオメカニクス研究に関する文献を検討してきた。その結果、今後の三段跳びのバイオメカニクス研究で考えなければならない課題がいくつか明らかにされた。

多くのスポーツ種目のバイオメカニクスの研究では、定量的な分析が行われている。それに比べると、三段跳びをバイオメカニクスの手法によって定量的に研究した報告は少ない。この理由として、三段跳びでは40-50 mの助走と、ホップ、ステップ、ジャンプの3つの踏切局面と、着地から成り立っており、これらすべてを高速カメラやフォースプレートなどの測定器具を用いて動作や地面反力を記録し、定量的に分析することが困難であることがあげられる。しかし、三段跳びのバイオメカニクスの特徴を定量的に明らかにするためには、動作や地面反力を分析することは必須の条件である。

三段跳びにおいて着地時と離地時の地面反力はパフォーマンスを決定する重要な要因であるとともに、それぞれの選手によって特徴的な結果を示すことが考えられる。したがって、三段跳びにおける地面反力の分析は三段跳びの力学的メカニズムを明らかにするために欠かせないものと考えられる。しかし、これまでのところ三段跳びの地面反力を明らかにした研究はほとんどみられず、踏切局面における衝撃力、負荷率、各局面ごとの平均力、平均仕事、機械的パワーなどの重要な力学量がまだ明らかにされていない。

三段跳びをバイオメカニクスの的に研究するときには、選手のからだを単純なモデルに置き換えることが必要である。これまでの研究では、選手の身体重心だけに着目し、その運動を分析しているものが多かった。しかし、人体は上腕、前腕、大腿、下腿、体幹というようにいくつか体節の集合体である。これらの体節はそれぞれが運動を行い、パフォーマンスに対して貢献しているのである。したがって、三段跳びのバイオメカニクスのメカニズムを明らかにするためには、重心だけの運動を分析するだけではなく、各体節の運動をバイオメカニクスの的に解明することが必要である。三段跳びにおける各体節の運動をバイオメカニクスの的に検討することは、今後の重要な課題の一つであると考えられる。

運動している選手のからだの中では、さまざまな筋群が活動している。筋群が収縮すると、そのときに発生する力は腱や靱帯をとおして骨

に伝えられる。そして、筋群が発揮している骨格は関節を中心にして回転運動を行う。このときに筋群が発揮している力を直接測定することは困難であるので、力学的モデルを用いて関節的に筋群が発揮している力を各関節の力モーメントや筋パワーなどの力学量に寄って推定する方法がバイオメカニクスではよく利用されている。しかし、三段跳びについてこのような力学量を明らかにした研究はまだみられない。三段跳び中の関節まわりの力モーメントや筋パワーを明らかにすることにより、選手の筋骨格系のメカニズムを解明することができると考えられる。このような力学的研究も今後の重要な課題である。

三段跳びは多くの筋群や関節が用いられて行われる運動である。このような多関節・多筋群の三段跳び中のバネ定数を数学モデルによって推定することも三段跳びのバイオメカニクスの特徴を明らかにするために必要なことと考えられる。この分野の研究もこれまでにあまり報告されていないが、今後のたいせつな課題の1つとなることが考えられる。

5. ま と め

本研究では、可能な限りの和、洋雑誌にあたるとともに国内外の文献データベースを検索し、十数篇の研究論文を収集し、三段跳びに関する先行研究をまとめてみた。その結果、これまでの三段跳びの研究では、キネマティクス(kinematics, 運動学)とキネティクス(kinetics, 運動力学)という2つの側面から行われていたことが明らかになった。キネマティクスの研究では、三段跳び選手の体の特定の部位の動きに注目し、変位、時間、速度、角度という変数を用いて三段跳びの運動学的特徴を明らかにされている。キネティクスの研究では、身体全体が受ける外力から、力積、機械的エネルギー、機械の仕事、機械的パワーを研究し、運動発見のもとになる力を明らかにしている。これまでに用いられた被験者は、三段跳びの初心者から世界記録保持者までであったが、他のスポーツ種目の研究に比べると、被検者の数は少ない。今後は、被検者の数を増やしながら、

三段跳びのバイオメカニクスの特徴を明らかにしていくことが必要である。三段跳びでは、数十メートルの助走、ホップ・ステップ・ジャンプの3つの踏切、そして着地と5つの運動局面から成り立っている。そのために、すべての局面のバイオメカニクスの特徴を高速度カメラやフォースプレートを用いて一度の試技で行うことは困難である。今後は、それぞれの測定器具を複数用いて一度の試技でデータを得ることを検討することも重要な課題となる。

附 記

本研究にあたり、御指導頂いた中京大学体育学研究科湯浅景元教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Alexander, R. M. and Vernon, A. : The mechanics of hopping by kangaroos. *J. Zool.*, 177 : 265-392, 1975.
- 2) Bober, T. : Invertigation of the take-off technique in the triple jump. *Biomechanics IV*, 1 : 149-154, 1974.
- 3) Ballreich, R. : An analysis of long-jump. *Biomechanics III*, 8 : 394-402, 1973.
- 4) Bosco, C., et al. : Kinetics and kinematics of the take-off in the long jump. *Biomechanics V-B* : 174-180, 1976.
- 5) Bedi, J. F. and Cooper, J. M. : Take off in the long jump—Angular momentum considerations. *J. Biomech.*, 10 : 541-548, 1977.
- 6) Hay, J. G., : The Biomechanics of the long jump. *Exer. Sport Sci. Rev.*, 14 : 401-447, 1986.
- 7) Hay, J. G., et al. : The techniques of elite male long jumpers. *J. Biomech.*, 19 : 855-866, 1986.
- 8) Hay, J. G. and Miller, J. A. : Techniques used in the triple jump. In. *J. Sports Biomech.*, 1 : 185-196, 1985.
- 9) Flynn, J. E. : Cinematographic study of the kinematic and temporal analysis of the takeoff in the running long jump,

- Track & Field Quart. Rev., 73 : 222-230, 1973.
- 10) 深代千之ほか：三段跳びの Biomechanics-(1) Kinematics-. 新体育, 50 : 726-731, 1980.
- 11) 深代千之ほか：三段跳びの Biomechanics -(2) Kinetics-. 新体育, 50 : 800-806, 1980.
- 12) Fukashiro, S. et al., : A Biomechanical study of the triple jump. Med. Sci. Sports Exer., 13 : 233-237, 1981.
- 13) Fukashiro, S. and Miyashita, M. : An estimation of the velocities of three take-off phases in 18-m triple jump. Med. Sci. Sports Exer., 15 : 309-312, 1983.
- 14) 深代千之：走り幅跳びと三段跳の Biomechanics. J. J. Sports. Sic., 2-8 : 600-613, 1983.
- 15) Ganslen, R. V., : Style in the Hop, Step, Jump. Athletic J., May : 12-14, 1956.
- 16) Ganslen, R. V., : The dynamics of efficient triple jumping. Athletic J., March : 12-13, 1964.
- 17) Klissouras, V. and P. V. Karpovich : Electrogoniometric study of jumping events. Res. Quart., 38 : 41-48, 1967.
- 18) 木村征人：Triple jump における効果的 Limb Action ; Swing Type の運動に着目して. 東京女子体育大学紀要, 5 : 96-106, 1970.
- 19) 木村征人：三段跳びの運動構造と技術の進化. 東京女子体育大学紀要, 6 : 34-47, 1971.
- 20) Larkins, C. : 初心者 of 三段跳技術の生体力学的分析. 陸上競技研究, 4-2 : 54-60, 1993.
- 21) Luhtanen, P. and Komi, P. V. : Force-, Power-, and Elasticity-Velocity Relationships in Walking, Running, and Jumping. Eur. J. Appl. Physiol., 44 : 279-289, 1980.
- 22) Luhtanen, P. and Komi, P. V. : Mechanical power and segmental contribution to force impulses in long jump take-off. Eur. J. appl. Physiol., 41 : 267-274, 1979.
- 23) Miller, J. A. and Hay, J. G. : Kinematics of a world record and other world-class performances in the triple jump. International J. Sports Biomech. 2 : 272-288, 1986.
- 24) 織田幹雄：陸上競技その本質と方法, 旺文社
- 25) 関岡康雄：三段跳び, ベースボール・マガジン社, pp. 11-56, 1975.
- 26) McNab, T., : Triple jump. British Amateur Athletic Board and Amateur Athletic Association. England.
- 27) Ramey, M. R. and Williams, K. R. : Ground reaction forces in the triple jump. Int. J. Sports Biomech., 1 : 233-239, 1985.
- 28) Ramey, M. R. : Force relationships of the running long jump. Med. Sci. Sports, 2 : 146-151, 1970.
- 29) Ramey, M. R. : Use of force plates for long-jump studies. Biomechanics III, 8 : 370-380, 1973.
- 30) Ward-Smith, A. J. : The influence of aerodynamic and biomechanical factors on long jump performance. J. Biomech., 16 : 655-658, 1983.